

Обсуждаются особенности измерений параметров оптического излучения в оптическом волокне и волоконно-оптических системах передачи информации. Рассмотрены вопросы обеспечения единства измерений мощности оптического излучения, состояние и перспективы развития эталонной базы в Украине.

**УДК 681.7.069**

**Ю.П. Мачехин**, докт.техн.наук,  
Харьковский национальный университет  
радиоэлектроники

**Е.П. Тимофеев**, канд.техн.наук,  
**А.И. Расчектаева**, научный сотрудник,  
Национальный научный центр  
«Институт метрологии», г. Харьков

**Д.Н. Татьяна**ко, ведущий инженер,  
Институт радиофизики и электроники  
им. А.Я. Усикова НАН Украины,  
г. Харьков

## **ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ В ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ. ПРИНЦИПЫ И ЗАДАЧИ РАЗВИТИЯ**

### **ВВЕДЕНИЕ**

Одним из основных направлений развития волоконно-оптических систем передачи информации (ВОСП) является увеличение скорости передачи большого объема информации с использованием оптических каналов DWDM систем. Гарантия успешного решения этой задачи является обеспечение необходимых параметров волоконно-оптических кабелей. Одной из составляющих требуемого обеспечения является использование современной контрольно-измерительной техники, ее метрологического обеспечения для объективно контроля параметров оптического волокна с минимально достижимой погрешностью измерений.

На Украине также последнее десятилетие происходит стремительное развитие волоконно-оптических систем передачи информации. Это делает актуальными вопросы метрологического обеспечения измерения параметров ВОСП как системы в целом, а также оптического волокна и элементов системы.

При этом качество и технические параметры ВОСП и их соответствие требованиям государственных стандартов определяются точностью измерений и их единством.

Метрологическое обеспечение измерений параметров оптического волокна и ВОСП имеет ряд особенностей:

- необходимость создания комплексной специализированной системы метрологического обеспечения измерений не отдельных физических величин, а области использования ВОСП и соответствующей эталонной базы; необходимость совершенствования уже имеющейся эталонной базы, как по номенклатуре, так и по диапазонам и точностям величин и параметров систем;

- довольно жесткие требования к измеряемым параметрам и величинам;

- с развитием ВОСП происходит быстрый рост как номенклатуры средств измерительной техники (СИТ), так и количества рабочих СИТ. СИТ, которые эксплуатируются на Украине, в основном импортного производства;

- постоянная тенденция улучшения точности рабочих СИТ (за последние 10 лет приблизительно в 3 раза), эта тенденция приводит к постоянному отставанию по диапа-

зонам измерения и погрешностям измерения эталонной базы системы метрологического обеспечения от потребностей практики.

Следует подчеркнуть, что номенклатура измеряемых параметров оптического волокна и ВОСП, а, следовательно, и необходимость решения задач метрологического обеспечения, определяются требованиями производства и эксплуатации компонентов и систем в целом.

#### ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ВОСП

Важнейшими информативными параметрами ВОСП являются мощность оптического излучения, длина (место повреждения) оптического волокна (кабеля) и затухание мощности оптического излучения в оптическом волокне (кабеле). Отсюда можно выделить следующие основные СИТ для задач прокладки и эксплуатации ВОСП: оптические тестеры и оптические рефлектометры.

Оптические тестеры предназначены для измерения затухания оптического излучения в оптических волокнах и являются самыми широко используемыми средствами измерительной техники [1]. Современные измерители мощности оптического излучения и оптические тестеры для ВОСП имеют широкие динамические диапазоны и высокую точность измерения мощности оптического излучения, например, оптические тестеры Multitest FTB 3930 (EXFO, Канада) имеют динамический диапазон от минус 73 дБм до 26 дБм и погрешность измерения оптической мощности  $\pm(0,05 \cdot P + 5 \cdot 10^{-11})$  Вт [2].

Оптический рефлектометр предназначен для измерения параметров, характеризующих распространение излучения в волоконно-оптическом тракте – расстояния до мест неоднородности (повреждения) в волокне, а также затухания оптического излучения в оптических волокнах. Основным принципом работы оптического рефлектометра – определение характеристик оптического волокна по измеренному обратному рассеянию. Основное преимущество измерений по обратному расстоянию состоит в том, что они требуют доступа только к одному концу звена волокна, при этом, позволяя определить состояние волокна [3]. Современные оптические рефлектометры имеют большие диапазоны и высокую точность измерения длины волокна (кабеля), например, рефлектометрические модули FTB 7000, которые используются с измерительной системой FTB 200/400 (EXFO, Канада) имеет диапазон измерения длины волокна от 0,75 м до 400 км и погрешность измерения длины волокна  $\pm(0,75 + 10^{-5} \cdot L + d)$  м ( $d$  – интервал отсчета, м) [4].

При создании высокоточных измерителей мощности оптического излучения и модернизации уже существующих эталонов одним из важнейших вопросов является выбор типа детектора, как основного элемента.

Можно выделить две группы детекторов оптического излучения:

- термические устройства: это спектрально неселективные устройства, основанные на эффекте изменения температуры, например, в термоэлементах или пироэлектрических детекторах под воздействием оптического излучения и преобразования полученного значения температуры в электрический сигнал, с последующей его обработкой. Одним из недостатков термических устройств является инерционность изменения температуры;

- фотонные детекторы: это детекторы, которые генерируют электрический сигнал под воздействием фотонов, падающих на фоточувствительную поверхность устройства, то есть устройства, работающие на принципе фотоэффекта. Это такие устройства, как фотоэлектронные умножители, фотоэмиссионные детекторы и полупроводниковые фотодиоды. Их чувствительность обычно значительно зависит от длины волны излучения и ограничивается относительно узким спектральным диапазоном.

Во вторичных эталонах и эталонах-переносчиках (Transfer Standard) наибольшее распространение получило использование полупроводниковых фотодиодов благодаря

тому, что они покрывают более широкий спектральный диапазон и более производительны.

Идеальный прецизионный детектор должен иметь следующие свойства [5]: высокую чувствительность, широкий динамический диапазон, однородную пространственную чувствительность, большую фоточувствительную площадку, высокое быстродействие, надежность, стабильность во времени, спектральную однородность (spectrally flat), или, по крайней мере, плавно изменяющуюся спектральную функцию, необходимую спектральную чувствительность в пределах заданного спектрального диапазона.

Всем этим требованиям удовлетворяют полупроводниковые фотодиоды. Но одним из недостатков является их переменная спектральная чувствительность. Важность спектральной чувствительности проявляется в ее влиянии на фототок фотодиода, который является основным метрологическим выходным параметром фотодетектора. Значение спектральной чувствительности связано с коэффициентом отражения от поверхности фоточувствительного слоя фотодиода, зависящего от длины волны падающего оптического излучения. Это также влияет на внешнюю квантовую эффективность фотодиода. При изменении длины волны излучения и при постоянном угле падения излучения на фотодиод и неизменной мощности оптического излучения будет меняться количество отраженного излучения. Следовательно, будет меняться квантовая эффективность, что приводит к изменению величины фототока. От поверхности фотодиода может отражаться более 35 % мощности падающего на него оптического излучения [6]. Таким образом, на основании всего вышеизложенного можно сделать вывод, что большая часть энергии оптического излучения не учитывается при измерении фототока фотодиода, причем эта величина изменяется (варьируется) от длины волны излучения. Одним из путей снижения влияния этого фактора является уменьшение количества энергии, отраженной от поверхности фотодиода.

Для решения данной проблемы Залевским и Дудой [7] в 1983 году была предложена схема «трап» детектора, в которой падающий луч подвергается многократным отражениям в последовательности фотодиодов. Основная цель такой конфигурации – понижение коэффициента отражения детектора и, следовательно, понижение спектральных изменений в квантовой эффективности. Таким образом, благодаря «трап» конфигурации детектор можно считать квантово однородным. Предсказуемая спектральная зависимость чувствительности «трап» детекторов делает их подходящими для использования в качестве эталонов единицы мощности оптического излучения (вторичные эталоны, эталоны-переносчики (Transfer Standard)).

Ведущие метрологические институты мира, такие как PTB, (Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Германия), NIST (The National Institute of Standards and Technology, США), используют в качестве вторичных эталонов единицы уровня оптической мощности – системы измерения оптической мощности на базе «трап» детекторов. В таких устройствах квантовая эффективность достигает значения 99,9 %, то есть 99,9 % мощности (энергии) оптического излучения, падающего на фоточувствительную поверхность фотодиода, преобразуется в фототок.

Наиболее используемой конфигурацией «трап» детектора является пространственная конфигурация, представленная на рис. 1. За счет наклона фотодиодов под углом  $45^{\circ}$  по отношению к направлению распространения луча учитывается поляризация излучения отраженного от поверхности фотодиодов [8].

В состав эталона вводятся два измерителя средней мощности оптического излучения. Первый измеритель предназначен для работы в открытом пространстве в спектральном диапазоне от 400 нм до 1100 нм и основан на «трап» детекторе на базе трех фотодиодов S 1337 [9].

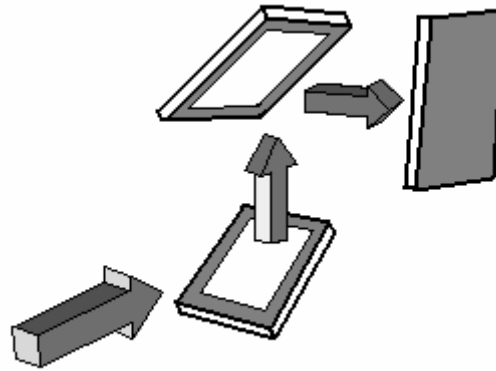


Рис. 1. Поляризационно-независимый трап детектор.

Второй измеритель предназначен для измерения мощности оптического излучения, распространяемого в оптическом волокне, и основан на «трап» детекторе, создаваемом на базе трех фотодиодов G 8370 [9]. Этот измеритель предназначен для работы в инфракрасном (ИК) спектральном диапазоне на длинах волн от 900 нм до 1600 нм.

Применение выбранных измерителей для эталона позволит обеспечить малую погрешность воспроизведения единицы средней мощности световых потоков.

Техническое решение, которое обеспечивает расширение возможностей действующего эталона в области воспроизведения длины световода и времени распространения сигнала в световоде для поверки оптических рефлектометров, было выбрано с учетом современных достижений в области измерения параметров электромагнитного поля в материальной среде. Планируется создание этой части эталона на базе метода, предложенного в [10]. В основу метода положена зависимость измеренной длины оптического волокна от времени распространения по нему оптического излучения:

$$L = \frac{cT}{N}, \quad (1)$$

где  $L$  – длина оптического волокна;  
 $T$  – время распространения оптического излучения по оптическому волокну;  
 $c$  – скорость света в вакууме;  
 $N$  – показатель преломления волокна.

Таким образом, погрешность определения длины оптического волокна зависит от погрешности измерения времени распространения по нему оптического излучения. Для высокоточного измерения временных интервалов распространения оптического излучения предлагается использовать метод, основанный на преобразовании этих временных интервалов в частоту. Предлагаемый метод может быть реализован на основе метода оптического «гашения» с помощью устройства, приведенного в [10], которое является модификацией конструкции, предложенной в [11].

#### СРАВНЕНИЕ ЭТАЛОННОЙ БАЗЫ УКРАИНЫ И ДРУГИХ СТРАН

В работе [1] была предложена локальная поверочная схема для средств измерения мощности лазерного излучения малых и сверхмалых уровней. В ней присутствует Государственный первичный эталон единицы мощности слабых импульсных световых потоков излучения от  $1 \cdot 10^{-6}$  до  $1 \cdot 10^{-2}$  Вт в диапазоне длин волн от 0,4 до 1,6 мкм (ДЕТУ 11-03-06) (далее – эталон), который предназначен для воспроизведения, хранения и передачи рабочим эталонам и СИТ единицы средней мощности в импульсе потоков излучения в видимом и близком инфракрасном диапазоне длин волн, т.е. его основная

функция обеспечение единства измерений параметров оптического волокна и волоконно-оптических систем.

В настоящий момент метрологические характеристики Государственного специального эталона, который был разработан в 1995 году, не удовлетворяют современным требованиям экономики Украины. Рабочие СИТ имеют диапазоны измерения шире и более высокую точность измерения. Эталон имеет диапазон воспроизведения единицы средней мощности непрерывного излучения в световодах от  $1 \cdot 10^{-6}$  Вт до  $1 \cdot 10^{-2}$  Вт (от минус 30 дБм до 10 дБм) на длинах волн 0,85 мкм; 1,3 мкм и 1,55 мкм, среднее квадратическое отклонение (СКО) –  $2 \cdot 10^{-2}$  и неисключенную систематическую погрешность –  $2 \cdot 10^{-2}$  [12].

Для сравнения приведем характеристики аналогичных российских эталонов, которые созданы ВНИИОФИ [13]:

- рабочий эталон единицы средней мощности, ослабления и обратных потерь: диапазон воспроизведения единицы средней мощности излучения от  $1 \cdot 10^{-12}$  Вт до  $1 \cdot 10^{-2}$  Вт (от минус 90 дБм до 10 дБм),  $\Delta_p = (0,5 \dots 3) \cdot 10^{-2}$  (от 0,02 дБ до 0,13 дБ);  $\Delta_o = (0,5 \dots 2) \cdot 10^{-2}$  (от 0,02 дБ до 0,9 дБ) [14];

- рабочий эталон единицы средней мощности (для поверки оптических тестеров, источников и приемников излучения): диапазон воспроизведения единицы средней мощности излучения от  $1 \cdot 10^{-5}$  Вт до  $3 \cdot 10^{-2}$  Вт,  $\Delta_p = (1,5 \dots 3) \cdot 10^{-2}$  [14];

- рабочий эталон единицы длины и ослабления для световодов (для поверки оптических рефлектометров): диапазон воспроизведения единицы длины от 0,06 км до 500 км,  $\Delta_L = (0,2 + 1 \cdot 10^{-5} \cdot L)$  м; диапазон воспроизведения единицы ослабления от 0,5 дБ до 25 дБ,  $\Delta_A = (0,02 \cdot A)$  дБ [14].

В результате проведенного анализа современных методов и средств измерений средней мощности оптического излучения и длины оптического волокна, анализа состава и структуры аналогичных эталонов зарубежных стран (РТВ (Германия), NIST (США), ВНИИОФИ (Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Россия)) можно сказать, что на данном этапе на Украине Государственный первичный эталон единицы мощности слабых импульсных световых потоков излучения не обеспечивает единство измерений в данной области, а, следовательно, необходимо проведение работ по его модернизации и расширению.

Основная цель данной работы обеспечение единства измерений параметров оптического волокна и волоконно-оптических систем передачи информации. Основными задачами метрологического обеспечения на Украине в этой области является:

- создание соответствующей эталонной аппаратуры и методов передачи размеров единиц;
- разработка нормативной документации по общим техническим требованиям, методам измерений, поверочным схемам, методам поверки и калибровки рабочих СИТ;
- проведение организационной и технической работы по разработке и внедрению средств поверки и по сличению высокоточных СИТ;
- гармонизация нормативной документации с международными требованиями и стандартами.

Данная цель может быть достигнута модернизацией Государственного эталона, который осуществляет метрологическое обеспечение в данной области измерений.

Основные задачи совершенствования украинского Государственного первичного эталона единицы мощности слабых импульсных световых потоков излучения:

- расширение динамического диапазона воспроизведения единицы средней мощности оптического излучения;

- уменьшение погрешности воспроизведения единицы средней мощности оптического излучения;
- создание дополнительного комплекса эталонной аппаратуры для воспроизведения длины и времени распространения сигнала в световоде для поверки оптических рефлектометров;
- модернизация поверочной схемы.

#### ЭТАЛОННЫЕ ПРЕЦИЗИОННЫЕ ИЗМЕРИТЕЛИ МОЩНОСТИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, ДЛИНЫ И ВРЕМЕНИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СИГНАЛА В СВЕТОВОДЕ

Эталонный прецизионный измеритель оптической мощности, выполненный, как говорилось ранее, на базе «трап» детектора, принимает оптическое излучение, преобразует его в напряжение, усиливает и передает на компьютер для дальнейшей обработки. Оптический аттенуатор позволяет эмитировать затухание в оптическом волокне, тем самым, давая возможность исследовать динамический диапазон измерителей оптической мощности. Оптический генератор позволяет измерять среднюю мощность оптического излучения в импульсе.

Аттестуемое (поверяемое) СИТ находится на поворотном столе вместе с эталонным измерителем оптической мощности. С помощью поворотного стола мы можем попеременно соединять эталонный и аттестуемый (поверяемый) измеритель оптической мощности с неподвижно закрепленным волокном. Это позволяет не перемещать волокно в процессе работы эталона, что повышает точность измерений.

Часть эталона, воспроизводящая, хранящая и передающая единицу оптической мощности в видимом диапазоне спектра излучения, имеет такие же функциональные свойства, как и часть, работающая в ИК диапазоне. Измеритель оптической мощности, который принимает оптическое излучение, преобразует его в напряжение и передает для дальнейшей обработки в компьютер. С помощью делительной пластины, имеющей известные метрологические характеристики, излучение передается также на СИТ, которое аттестуется (поверяется). Оптический ослабитель выполняет функцию оптического аттенуатора для видимого диапазона и позволяет измерять динамический диапазон измерителей мощности оптического излучения в видимом спектре излучения.

Опираясь на результаты исследований, а также на результаты анализа действующих эталонов России, Англии и Германии, главное направление усовершенствования эталона выбрано с учетом средств измерения мощности оптического когерентного излучения в оптических волокнах, и способов измерения времени распространения в оптических волокнах.

Распространение оптического излучения в материальной среде, а именно в оптических волокнах, характеризуется временем распространения и затуханием. Эти две величины являются основными параметрами, точность которых необходимо контролировать при поверке оптических рефлектометров.

Опираясь на оптическое волокно, как на основную среду, в которой распространяется излучение, предлагается расширить возможности метода предложенного в [11], и применить его для прецизионного измерения времени распространения оптического излучения в открытом пространстве и материальных средах. Физический принцип предлагаемого метода состоит в том, что распространение плоской электромагнитной волны по замкнутому оптическому пути (в открытом пространстве или материальной среде) может приводить к формированию прямоугольных оптических импульсов, длительность которых определяется только длиной замкнутого оптического пути.

Часть эталона, обеспечивающая измерение времени распространения оптического излучения в материальной среде, состоит из меры волокна, системы пространствен-

ного совмещения оптических пучков; импульсного фотоприемного устройства и цифрового частотомера.

Таким образом, выбранное техническое решение реализации измерения времени распространения оптического излучения в волокне позволит с помощью изменения частоты следования оптических меандров определить время распространения и длину оптического волокна.

В соответствии с задачами модернизации и усовершенствования эталона, измерительные функции эталона расширяются в области воспроизведения, хранения и передачи единицы оптической мощности за счет ввода в состав эталона эталонного прецизионного измерителя оптического излучения, в области воспроизведения, хранения и передачи единицы длины и времени распространения сигнала в световоде за счет ввода в состав эталона меры волокна и компаратора (эталонного измерителя времени распространения оптического излучения в волокне и длины волокна).

### ВЫВОДЫ

В результате проведенного анализа обеспечения единства измерений параметров оптического волокна и волоконно-оптических систем передачи информации мы пришли к выводу об отсутствии в Украине выходных эталонов с требуемыми метрологическими характеристиками. Существующий Государственный первичный эталон единицы мощности слабых импульсных световых потоков излучения отстает от потребностей экономики, диапазоны и погрешности воспроизведения единицы измерения находятся ниже или на уровне характеристик рабочих СИТ. Следовательно, необходима модернизация и расширение эталона. Определены основные цели и задачи модернизации эталона.

Внедрение результатов рассмотренных в данной работы, позволит создать современное метрологическое обеспечение широкого парка рабочих СИТ в данной области, которые используются, как в территориальных органах Госпотребстандарта Украины, так и в ведомственных метрологических службах. На сегодняшний момент номенклатура рабочих СИТ по видам составляет около 50 наименований, а по типам – около 500.

После усовершенствования своих метрологических характеристик, эталон будет находиться на уровне аналогичных эталонов России (ВНИИОФИ). Эталон будет полностью удовлетворять потребности Украины по обеспечению единства измерений в этой области измерений в стране на данном этапе и на ближайшую перспективу.

В дальнейшем после модернизации эталона необходимо провести всестороннее исследование метрологических характеристик эталона и провести международные сличения с аналогичными эталонами других стран.

### Литература

1. Мачехин Ю.П., Расчектаева А.И. Метрологическое обеспечение оптических тестеров и ваттметров // Радиотехника. – 2000. – № 116. – С. 149-152.
2. Руководство по эксплуатации «Модуль Multitest FTB 3930». 2007. – 115 с.
3. Machekhin Yu.P., Raschektayeva A.I. Metrology maintenance optic time-domain reflectometers. LFNМ`2001 3rd International Workshop on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling. Kharkov. 2001.
4. Руководство по эксплуатации «Модуль рефлектометра FTB 7000». 2007. – 239 с.
5. Fox N.P. Radiometry with cryogenic radiometers and semiconductor photodiodes // Metrologia. – 1995/96. – №32. – P. 535-543.
6. Gardner J.L. Transmission trap detectors // Applied Optics. – 1994. – Vol.33. – №25/1. – P. 5914-5918.
7. Zalewski E.F., Duda C.R. Silicon photodiode device with 100 % external quantum efficiency // Appl. Opt. – 1983. – Vol. 22/ – №18, P. 2867-2873.
8. Palmer J.M. Alternative Configurations for Trap Detectors // Metrologia. – 1993. – №30. – P. 327-333.
9. [www.hamamatsu.com](http://www.hamamatsu.com)
10. Мачехин Ю.П., Расчектаева А.И. Метод точного измерения длины оптического волокна и его реализация // Украинский метрологический журнал. – 2007. – №3. – С. 35-38.

11. Данелян А.Г., Мачехин Ю.П.. Новый метод практической реализации определения метра // Украинский метрологический журнал. – 2001. – №1. – С. 53-57.
12. ДСТУ 3387:96 Державна повірочна схема для засобів вимірювань потужності слабких імпульсних світлових потоків випромінювання від  $1 \cdot 10^{-6}$  до  $1 \cdot 10^{-2}$  Вт в діапазоні довжин хвиль від 0,4 до 1,6 мкм. – Київ: Держстандарт України, 1996. – 5 с.
13. Иванов В.С., Кравцов В.Е., Тихомиров С.В.. Состояние и проблемы обеспечения единства измерений в области волоконно-оптических систем передачи информации // Измерительная техника. – 2005. – № 11. – С. 60-64.
14. ГОСТ 8.585–2005 ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений длины и времени распространения сигнала в световоде, средней мощности, ослабления и длины волны для волоконно-оптических систем связи и передачи информации. –М.: ИПК Издательство стандартов, 2005. – 9 с.

## ОПТИЧНІ ВИМІРЮВАННЯ У ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАВАННЯ ІНФОРМАЦІЇ. ПРИНЦИПИ ТА ЗАДАЧІ РОЗВИТКУ

Ю.П. Мачехин, Є.П. Тимофєєв, А.І. Расчектаєва, Д.М. Татянюк

*Обговорюються особливості вимірювання параметрів оптичного випромінювання в оптичному волокні та в волоконно-оптичних системах передавання інформації. Розглянуті питання забезпечення єдності вимірювань потужності оптичного випромінювання, стан і перспективи розвитку еталонної бази в Україні.*

## OPTICAL MEASUREMENTS IN OPTICAL FIBRE SYSTEMS OF TRANSFER OF THE INFORMATION. PRINCIPLES AND TASKS OF DEVELOPMENT

Yu.P. Machekhin, E.P. Timofeev, A.I. Raschektayeva, D.M. Tatyanko

*Features of measurements of parameters of optical radiation in an optical fibre and optical fibre systems of transfer of the information are discussed. Questions of assurance of uniformity of measurements of power of optical radiation, a status and prospects of development of standard system in Ukraine are considered.*